



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**

---

# **SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UNA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA**

---

**FRANCISCO JOSÉ SÁNCHEZ RAMOS**  
**MENCIÓN: ELECTRÓNICA**

**Director: ABELARDO MARTÍNEZ ITURBE**  
**Ingeniería Electrónica y Comunicaciones**  
**Universidad de Zaragoza**

**Codirector: JULIO JAVIER MELERO ESTELA**  
**Ingeniería Eléctrica**  
**Universidad de Zaragoza**

**SEPTIEMBRE de 2011**



*A mis directores por su dedicación y paciencia  
y a mis padres porque sin ellos no hubiera podido llegar hasta aquí.*



## RESUMEN

### SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE PARAMETROS ELÉCTRICOS DE UNA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

El adecuado desarrollo de las energías renovables y la ruptura de las barreras tecnológicas que atenazan su crecimiento pasan ineludiblemente por un buen conocimiento de sus características de funcionamiento. Es necesario poder analizar con precisión el comportamiento de los sistemas de generación renovables así como su interacción con el sistema eléctrico en distintas condiciones de operación.

La razón de ser de este proyecto fin de carrera nace en la necesidad de caracterizar la calidad de suministro eléctrico y la fenomenología particular de sistemas fotovoltaicos para su futura integración con otras fuentes de generación renovables, siendo esta una de las tareas que componen el proyecto *“Investigación y desarrollo de un sistema multipropósito para el análisis integral de energías renovables”* (IDI-20071056 01) financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).

Para ello se diseñó un sistema de monitorización capaz de medir las variables eléctricas de una planta solar fotovoltaica y se materializó este diseño en dos equipos de medida de las mismas características. Dichos equipos son capaces de registrar valores de tensión e intensidad, tanto en continua como en alterna, cuentan con una unidad de memoria de 2 GB de capacidad y la posibilidad de comunicarse con un ordenador por medio de una conexión USB.

Una de las condiciones de diseño iniciales fue que en todo momento quedara protegida la instalación de posibles fallos del equipo de medida y viceversa. Esta condición se tuvo en cuenta en la elección de los componentes y se añadieron otros con este único fin.

Se prestó especial atención al ajuste y calibración de los equipos. En primer lugar se realizó el ajuste de cada una de las placas de acondicionamiento de cada equipo por comparación con instrumentos de referencia pertenecientes al Laboratorio de Metrología Eléctrica de la Universidad de Zaragoza (LME). A continuación se procedió al montaje completo de los equipos (placas de acondicionamiento, fuente de alimentación, reloj de tiempo real, Arduino) y a la introducción de los resultados del ajuste por medio de un portátil a través de la conexión USB. Para finalizar se realizó la calibración de ambos equipos emitiendo los certificados correspondientes según la acreditación ENAC con que cuenta el LME.

La instalación de ambos equipos se llevó a cabo en el interior de un seguidor solar propiedad de la Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón, que posee en el parque tecnológico Walqa en Huesca. En su interior, el seguidor cuenta con dos inversores, se colocó un equipo en cada uno de ellos de forma que se pudieran registrar todas las variables, tanto las de entrada (tensión e intensidad en continua) como las de salida (tensión e intensidad en alterna).

Dos días después de la instalación se descargaron los datos registrados y con los mismos se verificó el correcto funcionamiento de ambos equipos.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	11
1.1.	Objeto .....	11
1.2.	Estructura de la memoria .....	12
2.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN .....	13
2.1.	Seguidor .....	14
2.2.	Inversor .....	14
2.3.	Transformador .....	15
3.	DESARROLLO DEL EQUIPO DE MEDIDA .....	16
3.1.	Acondicionamiento de señales .....	17
3.1.1.	Diseño de las configuraciones de acondicionamiento .....	17
3.1.2.	Desarrollo de las placas de circuito impreso .....	19
3.2.	Placa Base: Microcontrolador .....	22
3.3.	Unidad de memoria .....	23
3.4.	Reloj de tiempo real .....	23
3.5.	Fuente de alimentación .....	24
3.6.	Montaje del Equipo .....	24
3.6.1.	La envolvente y su adecuación .....	24
3.6.2.	Conectores .....	25
3.6.3.	Disposición de las placas .....	26
4.	AJUSTE Y CALIBRACIÓN .....	28
4.1.	Ajuste de las placas de acondicionamiento .....	28
4.2.	Calibración de los equipos .....	30
5.	INSTALACIÓN Y RESULTADOS .....	31
5.1.	Instalación de los equipos .....	31
5.2.	Datos registrados .....	33
6.	MEJORAS Y DESARROLLOS FUTUROS .....	34
7.	CONCLUSIONES .....	37
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	38

---

ANEXO I: PLANOS GENERALES DE LA INSTALACIÓN DE LA FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO EN ARAGÓN .	39
ANEXO II: FICHA TÉCNICA, ADES 7F-18M .....	43
ANEXO III: FICHA TÉCNICA, INGECON SUN SMART (SIN TRANSFORMADOR) ...	47
ANEXO IV: CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DE LAS ETAPAS DE ACONDICIONAMIENTO .....	51
ANEXO V: VISTAS DE LAS PLACAS DE ACONDICIONAMIENTO EN PROTEL .....	57
ANEXO VI: ESQUEMATICO ARDUINO MEGA .....	63
ANEXO VII: PROGRAMA EN C DEL MICROCONTROLADOR .....	65
ANEXO VIII: MÓDULO MICROSD .....	83
ANEXO IX: MÓDULO <i>REAL TIME CLOCK</i> .....	85
ANEXO X: TOMA DE DATOS DE LA CALIBRACIÓN .....	87
ANEXO XI: CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN.....	99
ANEXO XII: IMÁGENES DE DATOS REGISTRADOS POR LOS EQUIPOS.....	111
ANEXO XIII: SENSOR HALL ALTERNATIVO.....	117
1.1.    Vista de la PCB en PROTEL .....	118
1.2.    Hoja de toma de datos de las pruebas de funcionamiento.....	119



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Instalaciones, Fundación Hidrógeno Aragón.....	13
Figura 2. Infraestructura solar, Fundación Hidrógeno Aragón.....	13
Figura 3. Vista seguidor objeto de estudio. ....	14
Figura 4. Ingecom Sun 10 TL (sin transformador).....	14
Figura 5. Transformador de Potencia. ....	15
Figura 6. Celdas de Fotovoltaica. ....	15
Figura 7. Diagrama de bloques del equipo de medida. ....	16
Figura 8. Canal de tensión continua.....	17
Figura 9. Conexión entre un amplificador de aislamiento y dos bombas de carga. ....	18
Figura 10. Arquitectura del sensor Hall. ....	18
Figura 11. Canal de tensión alterna.....	19
Figura 12. PCB tensión continua. ....	20
Figura 13. PCB corriente continua.....	20
Figura 14. PCB tensión alterna.....	21
Figura 15. PCB corriente alterna. ....	21
Figura 16. PCB Arduino MEGA. ....	22
Figura 17. PCB microSD. ....	23
Figura 18. PCB ET-MINI DS1307.....	23
Figura 19. Fuente de alimentación. ....	24
Figura 20. Vista panel frontal.....	24
Figura 21. Despiece envolverte. ....	25
Figura 22. Tipos de conectores. ....	25
Figura 23. Vistas de los equipo de medida.....	26
Figura 24. Disposición de las placas. ....	26
Figura 25. Vista interior de un equipo de medida. ....	27
Figura 26. Vista exterior de los equipos de medida.....	27
Figura 27. Seguidor ADES 7F18M. ....	31
Figura 28. Cuadro de protección. ....	31
Figura 29. Operaciones en el cuadro de protección.....	32
Figura 30. Torre del seguidor solar.....	32

Figura 31. Conexiones de medida.....	33
Figura 32. Tensión continua, equipo 1 (izquierda) y equipo 2 (derecha). ....	33
Figura 33. Sensores Hall: ACS713 y ACS714.....	34
Figura 34. Montaje para la realización de pruebas.....	35
Figura 35. Rectas de ajuste de los sensores Hall. ....	35
Figura 36. Vistas modulo radio-frecuencia. ....	36
Figura 37. Vista módulo GSM.....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Instrumentos de referencia utilizados para el ajuste. ....	28
Tabla 2. Datos del ajuste variables DC .....	28
Tabla 3. Datos del ajuste variables AC.....	29
Tabla 4. Ganancia de cada canal de ambos equipos.....	29
Tabla 5. Offset de cada canal de ambos equipos. ....	29
Tabla 6. Instrumentos de referencia utilizados para la calibración.....	30
Tabla 7. Resultados de la calibración: Error (%). ....	30
Tabla 8. Instrumentos de referencia utilizados para las pruebas. ....	34
Tabla 9. Desviación máxima (%). ....	36

## 1. INTRODUCCIÓN

El adecuado desarrollo de las energías renovables y la ruptura de las barreras tecnológicas que atenazan su crecimiento pasan ineludiblemente por un buen conocimiento de sus características de funcionamiento. Es necesario poder analizar con precisión el comportamiento de los sistemas de generación renovables así como su interacción con el sistema eléctrico en distintas condiciones de operación.

La motivación de este proyecto fin de carrera nace en la necesidad de caracterizar la calidad de suministro eléctrico y la fenomenología particular de sistemas fotovoltaicos para su futura integración con otras fuentes de generación renovables, siendo esta una de las tareas que componen el proyecto “Investigación y desarrollo de un sistema multipropósito para el análisis integral de energías renovables” (IDI-20071056 01) financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y desarrollado por la empresa aragonesa Instrumentación y Componentes (INYCOM) y el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).

Han colaborado en el desarrollo de este proyecto el Laboratorio de Metrología Eléctrica de la Universidad de Zaragoza prestando los equipos necesarios para la realización de pruebas y la Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón cediendo las instalaciones que posee en el parque tecnológico Walqa en Huesca para la instalación de equipos y realización de medidas.

### 1.1. Objeto

El objetivo principal del presente proyecto fin de carrera es diseñar un sistema de monitorización capaz de medir las variables eléctricas de una planta solar fotovoltaica y materializar este diseño en dos equipos de medida de las mismas características.

Dichos equipos han de ser capaces de registrar las siguientes variables:

- Tensión continua.
- Corriente continua.
- Tensión alterna.
- Corriente Alterna.

Han de contar con una unidad de memoria que les permita almacenar los datos registrados y la posibilidad de comunicarse con un ordenador por medio de una conexión USB tanto para poder modificar parámetros de los equipos como para llevar a cabo la descarga de los datos registrados.

Las condiciones de diseño referentes a las variables a medir han sido impuestas por los valores de operación de dos inversores reales sobre los que, una vez construidos los equipos, se han instalado.

Se ha analizado el funcionamiento de los equipos y propuesto aquellas mejoras que se han considerado necesarias para alcanzar unas especificaciones mejores.

## 1.2. Estructura de la memoria

La estructura de la memoria tiene un carácter cronológico. En primer lugar se realiza una descripción de la instalación donde se van a colocar los equipos, situada en el Parque Tecnológico Walqa (Huesca), describiendo las partes que se han considerado más relevantes (seguidor, inversor y transformador de potencia). En esta parte de la memoria fue necesario consultar las referencias [1] y [2] para poder obtener los datos necesarios para la realización de los siguientes apartados, así como la consulta de los ejemplos de funcionamiento de inversores descritos en la referencia [3].

A continuación se muestra el desarrollo de los equipos de medida, describiendo cada una de las partes que los componen. Estas partes se enumeran a continuación:

- Placas de acondicionamiento.
- Placa Base: Microcontrolador.
- Unidad de memoria.
- Reloj de tiempo real.
- Fuente de alimentación.

También se ha descrito el montaje de las distintas partes en la envolvente, explicando cómo se han interconectado. El diseño de las placas de acondicionamiento fue realizado con el software Altium Designer 2008 (Protel), consultando la referencia [4].

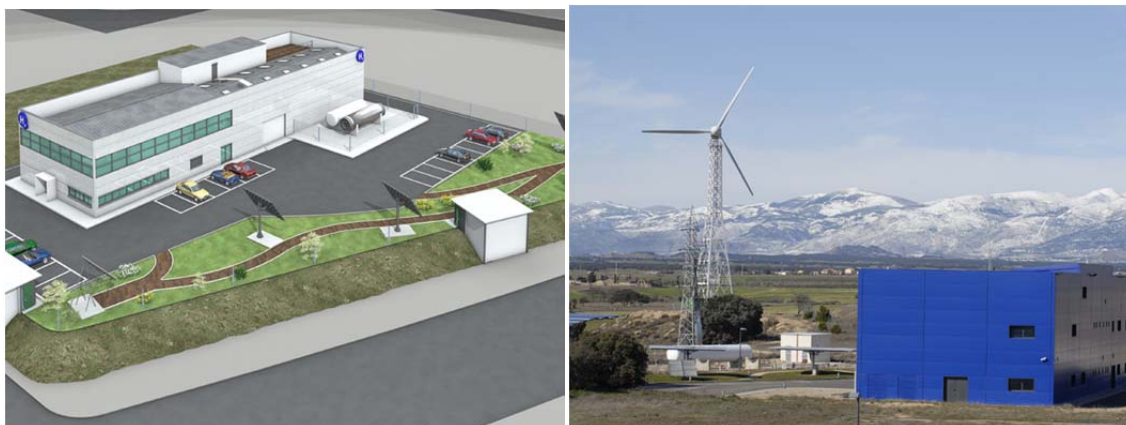
Una vez concluido el montaje de los equipos se llevó a cabo un ajuste y calibración de los mismos. Tras este ajuste se instalaron los equipos en el interior del seguidor descrito anteriormente, se verificó “in situ” la conexión y transcurrido un intervalo de varios días se descargaron los datos registrados, cuyos resultados pueden observarse en el apartado 5 y en el anexo XII.

En función de los resultados obtenidos tanto en la calibración como en los datos registrados se ha incorporado un capítulo en el que se describen posibles mejoras o desarrollos futuros.

Para finalizar se ha incluido un capítulo con las conclusiones obtenidas de todo el trabajo realizado.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La sede de la Fundación Hidrógeno Aragón está ubicada en el Parque Tecnológico Walqa en Huesca. Dispone de un edificio de 1200 metros cuadrados de superficie con oficinas, laboratorios y taller. El edificio está integrado en la Infraestructura Tecnológica de Hidrógeno y Energías Renovables (ITHER). El proyecto ITHER, es una instalación que consta de un parque eólico de 635 kW con tres aerogeneradores diferentes, una instalación solar fotovoltaica de 100 kW con siete tecnologías distintas, un electrolizador de tecnología polimérica y uno alcalino, y subsistemas de gestión de energía, interconexión a red eléctrica, almacenamiento de hidrógeno y uso final en pilas de combustible. Además, dispone de una hidrogenera para suministro de hidrógeno. En la Figura 1 se pueden observar algunas de estas instalaciones.



**Figura 1.** Instalaciones, Fundación Hidrógeno Aragón.

En el “ANEXO I: Planos generales de la instalación de la Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón” se muestran planos de las instalaciones citadas anteriormente.

La infraestructura solar fotovoltaica a su vez está compuesta por varios seguidores de distinta potencia y placas instaladas en el techo del parking del parque tecnológico Walqa, ver Figura 2.



**Figura 2.** Infraestructura solar, Fundación Hidrógeno Aragón.

## 2.1. Seguidor

El seguidor elegido como objeto de estudio es el de mayor potencia de la instalación, ADES 7F-18M (ver Figura 3).



**Figura 3.** Vista seguidor objeto de estudio.

Sus paneles se organizan de forma que tiene 6 salidas en continua, 4 de ellas a una tensión nominal de 569 V (17 paneles) y las otras 2 a 538 V (16 paneles). Las características constructivas del seguidor se pueden consultar en el “ANEXO II: Ficha Técnica, ADES 7F-18M”.

## 2.2. Inversor

En el interior de la torre del seguidor se dispone de dos inversores de las mismas características. El modelo del inversor es Ingeteam Sun 10 TL (sin transformador), cuenta con una potencia de salida de 10 kW. Su tensión de salida es 400 V en alterna, ver Figura 4.



**Figura 4.** Ingeteam Sun 10 TL (sin transformador).

Su etapa de conversión de potencia está formada por tres módulos de potencia independientes, y cada uno de ellos dispone de un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para extraer la máxima energía. De esta forma el equipo tiene 3 entradas MPPTs independientes.

A cada una de estas entradas se conectará una de las series en continua provenientes de los conjuntos de paneles (2 de 569 V y 1 de 538 V por inversor). Se pueden consultar en detalle las características del inversor en el “ANEXO III: Ficha Técnica, Ingecon Sun Smart (sin transformador)”.

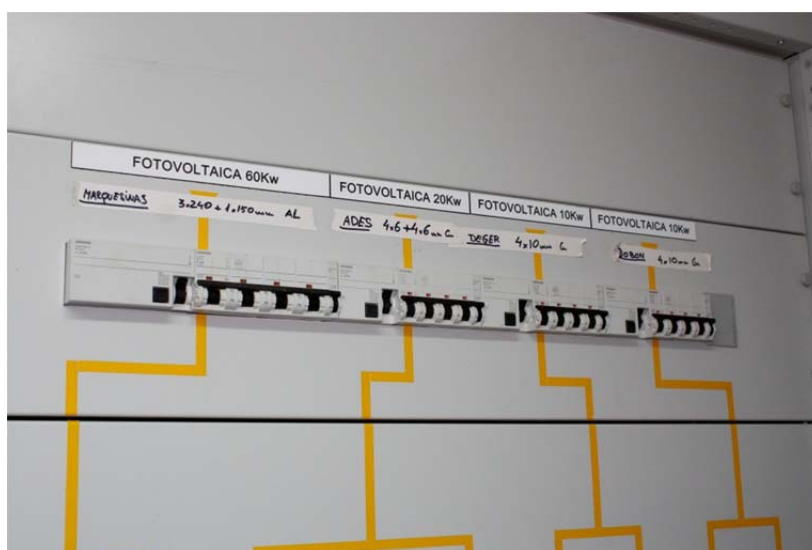
### 2.3. Transformador

El transformador de potencia, que evacua la energía generada, es común a toda la instalación solar fotovoltaica, ver Figura 5.



**Figura 5.** Transformador de Potencia.

Cuenta con una potencia de 100 kVA y unos niveles de tensión de 0.4/15 kV. Antes de llegar al transformador pasa por unas celdas eléctricas que unen la energía proveniente de cada una de las instalaciones fotovoltaicas según se puede observar en la Figura 6.



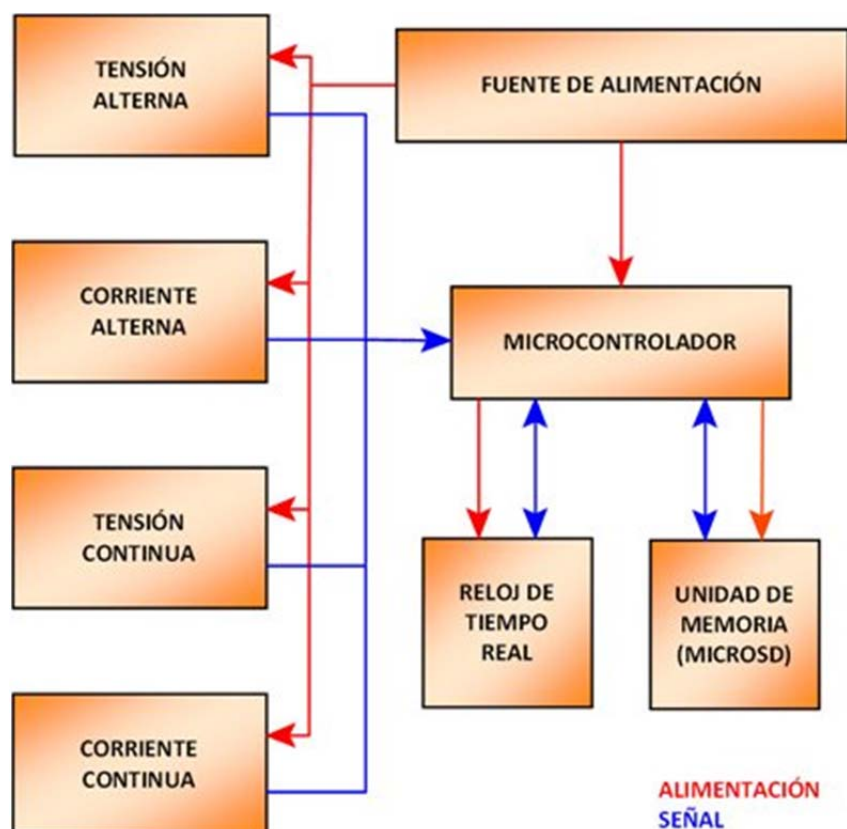
**Figura 6.** Celdas de Fotovoltaica.



### 3. DESARROLLO DEL EQUIPO DE MEDIDA

Se ha diseñado un sistema de monitorización capaz de medir las variables eléctricas de la planta solar fotovoltaica descrita en el apartado anterior. Este diseño se ha materializado en dos equipos de medida de las mismas características. Dichos equipos son capaces de registrar valores de tensión e intensidad, tanto en continua como en alterna, cuentan con una unidad de memoria y un reloj de tiempo real además de la posibilidad de comunicarse con un ordenador por medio de una conexión USB. Todo ello se gobierna mediante un microcontrolador y es alimentado de la energía necesaria para su correcto funcionamiento por una fuente de alimentación conmutada.

En la Figura 7 se puede observar el diagrama de bloques con las distintas partes que componen cada equipo de medida.



**Figura 7.** Diagrama de bloques del equipo de medida.

Una de las condiciones de diseño iniciales fue que en todo momento quedara protegida la instalación de posibles fallos del equipo de medida y viceversa. Esta condición se tuvo en cuenta en la elección de los componentes y se añadieron otros con este único fin. En los siguientes apartados se va a explicar más detalladamente cada una de las partes y la función que desempeñan en el equipo de medida para a continuación detallar cómo se han integrado estas partes conformando cada uno de los equipos.



### 3.1. Acondicionamiento de señales

Cada equipo cuenta con cuatro placas de acondicionamiento, con tres canales independientes cada una. El cálculo de los componentes que forman los sistemas de medida y protección se ha realizado en función de los valores nominales y máximos de tensión y de corriente que impone la instalación descrita en el punto 2 y más concretamente los de las señales de entrada y salida de los inversores.

#### 3.1.1. Diseño de las configuraciones de acondicionamiento

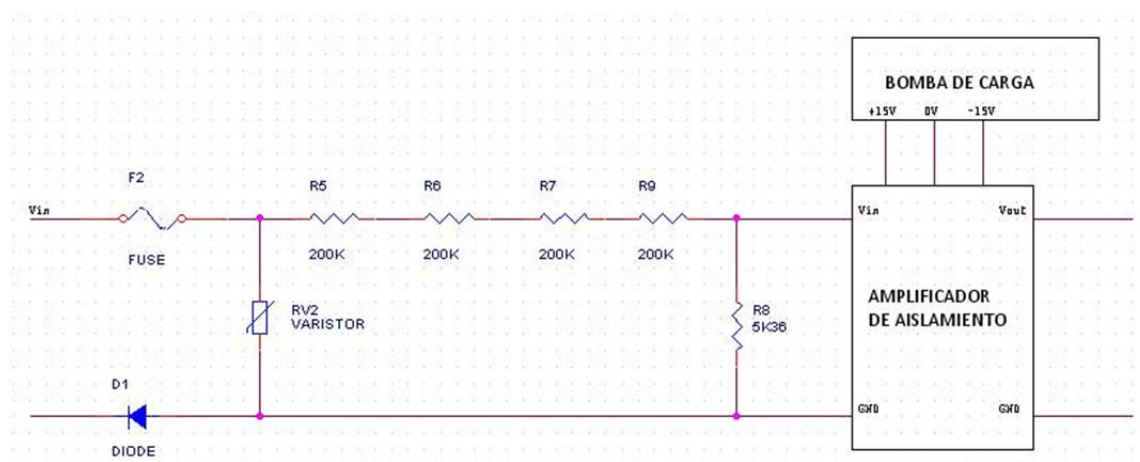
Se ha diseñado una placa de acondicionamiento para cada tipo de variable a medir (tensión continua, corriente continua, tensión alterna y corriente alterna). Se va a mostrar la configuración de uno de los 3 canales con que cuenta cada una de estas placas.

Todos los cálculos de los componentes se pueden ver de forma detallada en el “ANEXO IV: Cálculo y selección de componentes de las etapas de acondicionamiento”.

#### Tensión continua

Consta de tres canales independientes capaces de realizar medidas diferenciales. Cada canal dispone de un fusible (protección contra sobreintensidades), un varistor (protección contra sobretensiones) y diodo (protección ante una mala conexión de los cables) en paralelo con un divisor resistivo sobre el cual se realizará la medida.

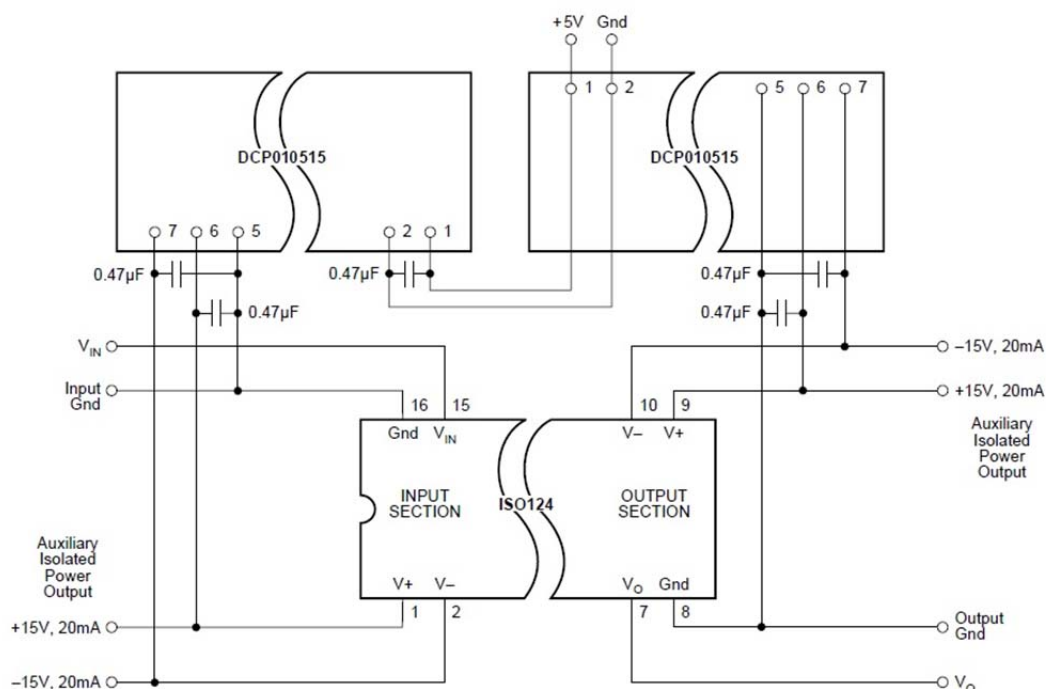
También dispone de un amplificador de aislamiento alimentado por una bomba de carga independiente (con separación galvánica), todo esto nos proporciona un aislamiento entre la parte que está conectada a la instalación de la parte que llega al microcontrolador. Esta disposición se puede ver en la Figura 8.



**Figura 8.** Canal de tensión continua.

Para la composición del divisor resistivo se han seleccionado unas resistencias especiales, que presentan una gran estabilidad con la variación de temperatura (15ppm/°C). De esta forma la medida que se realice también permanecerá estable frente a este tipo de variaciones.

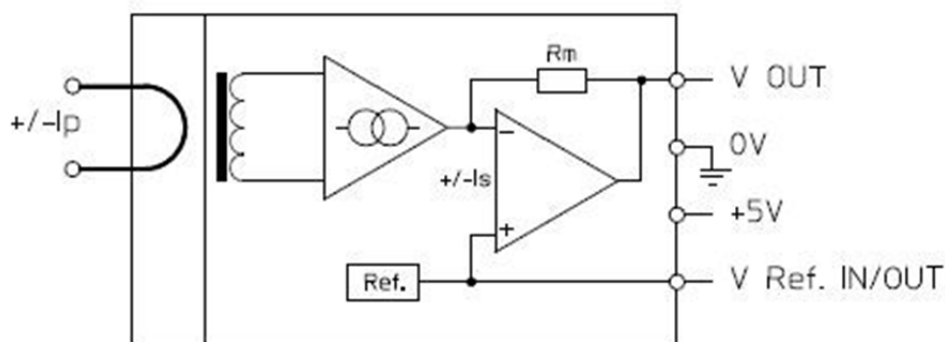
El aislamiento galvánico entre las distintas etapas, potencia, medida y alimentación se garantiza con el uso de amplificadores de aislamiento y bombas de carga que alimentan directamente estos amplificadores según se puede observar en la Figura 9. Se necesitan  $n+1$  bombas de carga, siendo  $n$  el número de amplificadores, para garantizar el aislamiento.



**Figura 9.** Conexión entre un amplificador de aislamiento y dos bombas de carga.

### Corriente continua

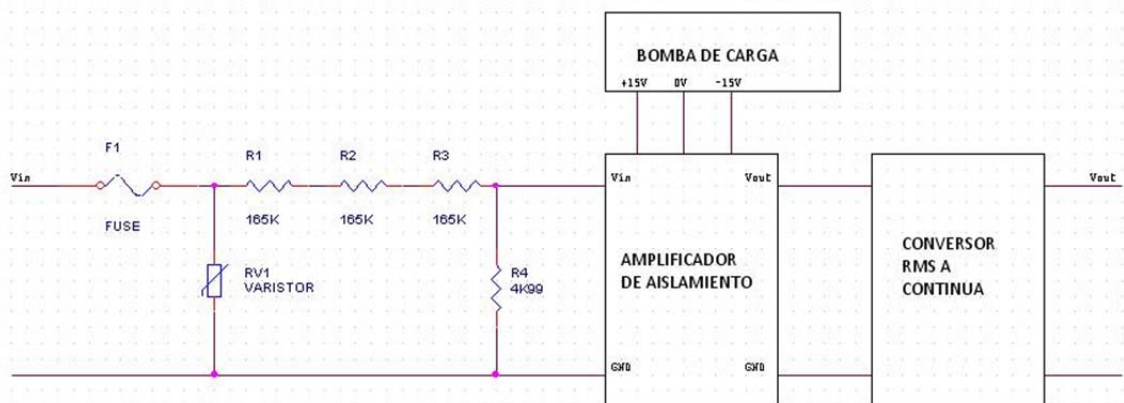
La medida de corriente continua se realiza utilizando un sensor de efecto Hall. Este sensor proporciona una señal en tensión proporcional a la corriente que pasa a través de él. Dispone de separación galvánica entre la corriente a medir y la salida, esto se puede observar en la Figura 10.



**Figura 10.** Arquitectura del sensor Hall.

## Tensión alterna

El acondicionamiento de la tensión alterna se ha realizado de forma similar la de tensión continua, incorporando a la salida del amplificador de aislamiento un conversor RMS a continua. Además se ha modificado la relación del divisor resistivo (esto es debido a que la tensión nominal del lado de continua es distinta a la del lado de alterna del inversor) y se ha eliminado el diodo de protección ante una mala conexión de los cables. Estos cambios pueden apreciarse mejor en la Figura 11.



**Figura 11.** Canal de tensión alterna.

El conversor incorporado a esta etapa genera un valor de tensión continua a su salida igual al valor eficaz de la onda de tensión de su entrada.

## Corriente alterna

El acondicionamiento de la corriente alterna se ha realizado de forma similar al de corriente continua, utilizando los mismos sensores Hall, por lo que permanece aislada galvánicamente la instalación del circuito de medida. Además se incorpora un conversor de RMS a continua, como el visto en la etapa de tensión alterna, para cada canal.

### **3.1.2. Desarrollo de las placas de circuito impreso**

A continuación se muestran unas imágenes de las placas de circuito impreso diseñadas con el software Protel DXP 2004 (Altium Designer). Se pueden ver capturas de pantalla del diseño de cada placa en Protel en el *“ANEXO V: Vistas de las Placas de Acondicionamiento en Protel”*.

## Tensión continua

Consta de tres canales independientes capaces de realizar medidas diferenciales, esta característica es posible gracias a la presencia de amplificadores de aislamiento y bombas de carga independientes para cada uno de éstos, de forma que se independizan los neutros de cada uno de los canales. La disposición de todos estos elementos se muestra en la Figura 12.

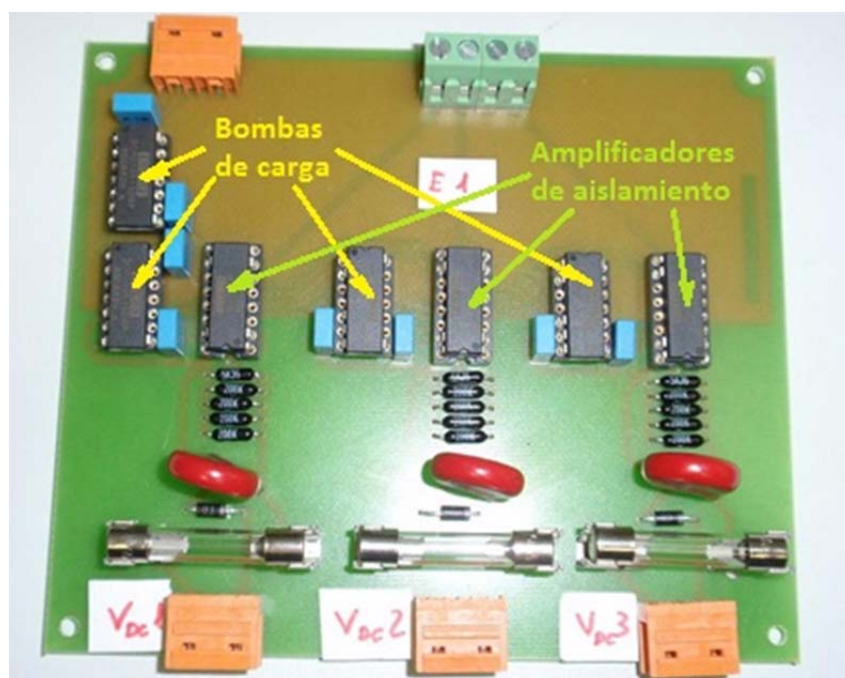


Figura 12. PCB tensión continua.

### Corriente continua

Consta de tres canales independientes, cada uno de ellos con un sensor Hall. El nivel de tensión de su salida es el adecuado para ser leído por las entradas analógicas de la placa del microcontrolador, por lo que no es necesario hacer ninguna transformación más. Únicamente se han incorporado unos condensadores de desacoplo. Todo esto puede observarse en la Figura 13.

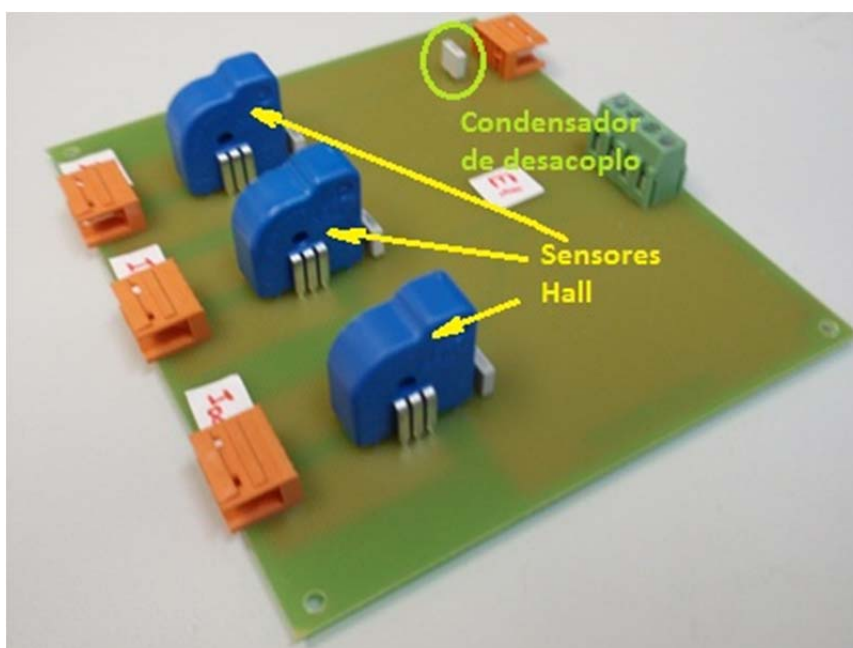
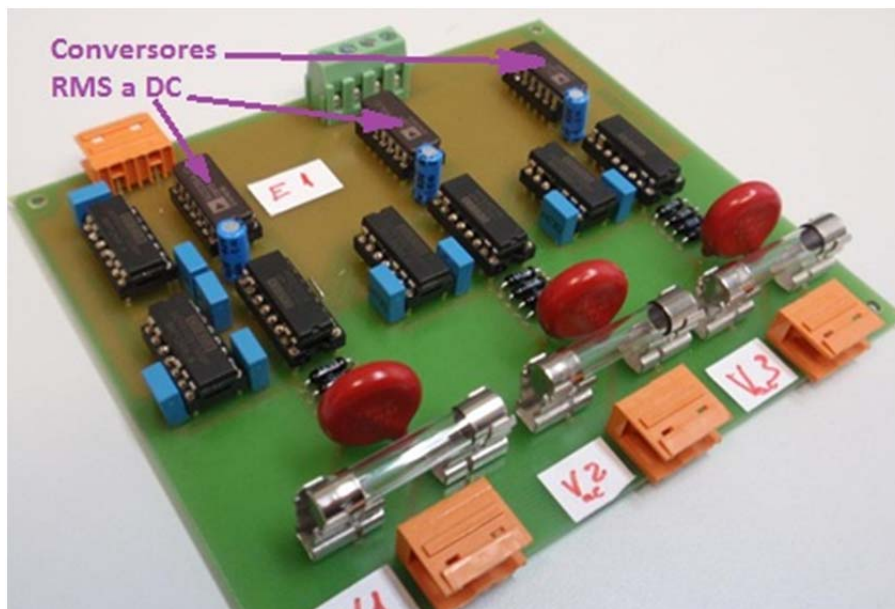


Figura 13. PCB corriente continua.

### **Tensión alterna**

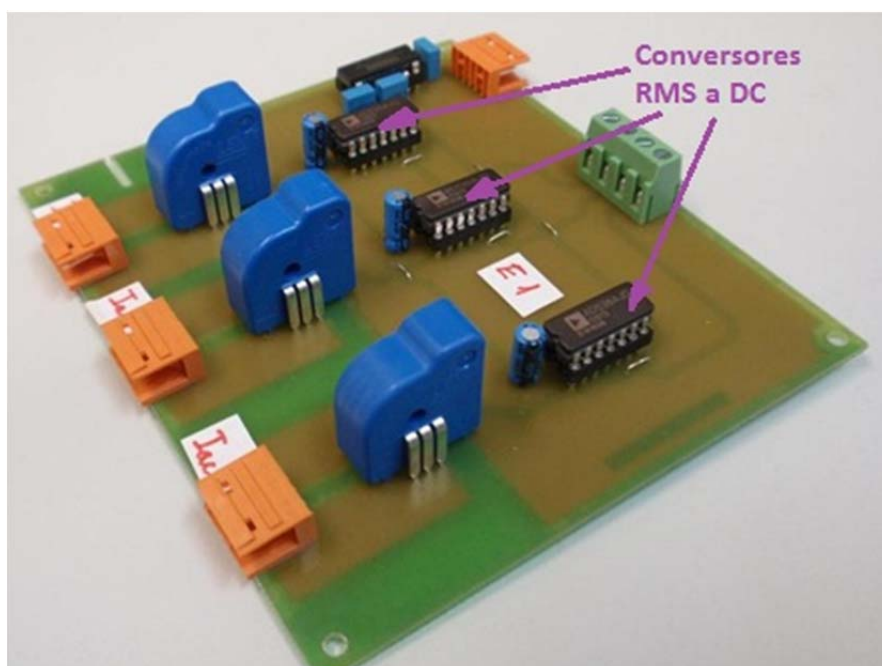
Consta de tres canales independientes (como la placa de tensión continua). En la Figura 14 se puede observar cómo se han incorporado los conversores de RMS a DC y se ha eliminado el diodo de protección.



**Figura 14.** PCB tensión alterna.

### **Corriente alterna**

Como se puede observar en la Figura 15 la única diferencia con la placa de Corriente continua es la inclusión de los conversores RMS a DC.



**Figura 15.** PCB corriente alterna.



### 3.2. Placa Base: Microcontrolador

Cada equipo cuenta con una placa base con entradas analógicas suficientes para poder registrar las 12 variables provenientes de las placas de acondicionamiento (3 canales por 4 placas). Toda la información referente a esta placa se ha obtenido de la referencia [5].

#### 3.2.1 Arduino MEGA

El Arduino Mega es una placa basada en el microcontrolador ATmega1280. Como se puede ver en la Figura 16, cuenta con 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas (5 voltios, 10 bit ADC), 4 UART (puerto serie), un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, ICSP, y un botón de reset. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o alimentarlo con un adaptador AC-DC o batería. Arduino Mega es compatible con una gran cantidad de módulos con muy diversas funcionalidades. Puede verse su esquemático en el “ANEXO VI: Esquemático Arduino Mega”

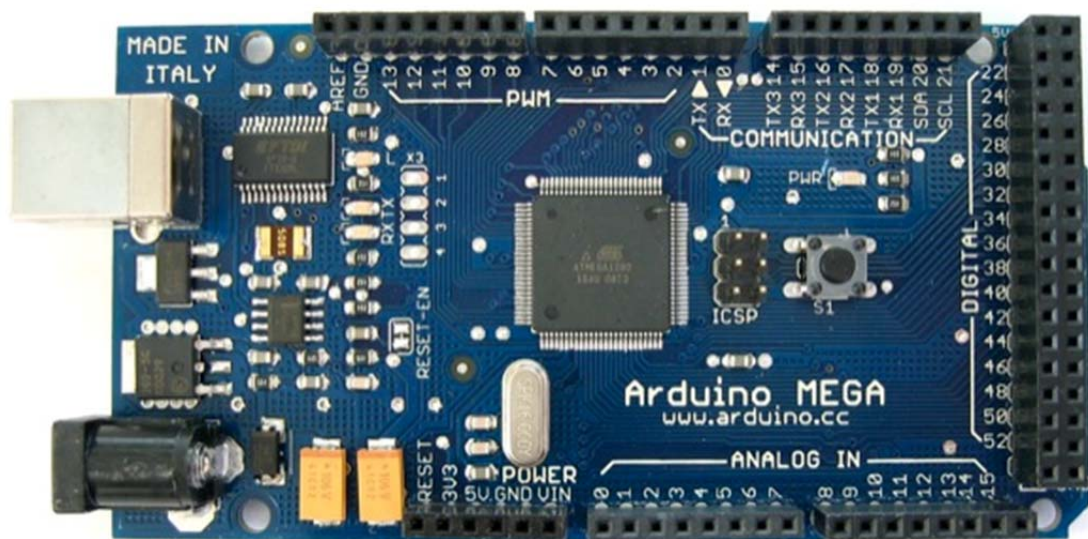


Figura 16. PCB Arduino MEGA.

#### 3.2.2 Programa de control

Se programó el microcontrolador de manera que fuera capaz de hacer las medias minutales (o diezminutales) de cada una de las variables de entrada, comunicarse con el reloj de tiempo real y grabar los datos en la memoria microSD en formato .csv, de forma que pueden ser tratados fácilmente con herramientas de terceros, por ejemplo Excel.

El listado del programa, en lenguaje C, se presenta en detalle en el “ANEXO VII: Programa en C del Microcontrolador”.

### 3.3. Unidad de memoria

Se ha incorporado un módulo de memoria microSD con una capacidad de 2 GB, específico para ser conectado a placas Arduino. Este módulo se conecta directamente a la placa del microcontrolador por medio del puerto ICSP, puede ser observado en la Figura 17.

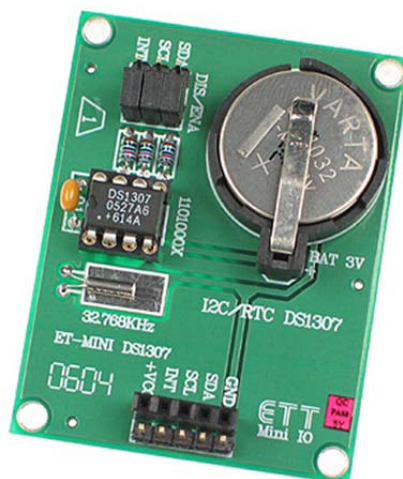


**Figura 17.** PCB microSD.

Tanto el esquemático como la forma de conectarlo con el Arduino Mega están descritos en el “ANEXO VIII: Módulo MicroSD”.

### 3.4. Reloj de tiempo real

Ofrece una alta estabilidad y precisión a lo largo del tiempo. Incluye una pila de botón ya montada como se muestra en la Figura 18. Proporciona valores tales como hora, minutos, segundos, día, mes y año. Dispone también de una memoria interna programable de 56 bytes para guardar alarmas no volátiles.

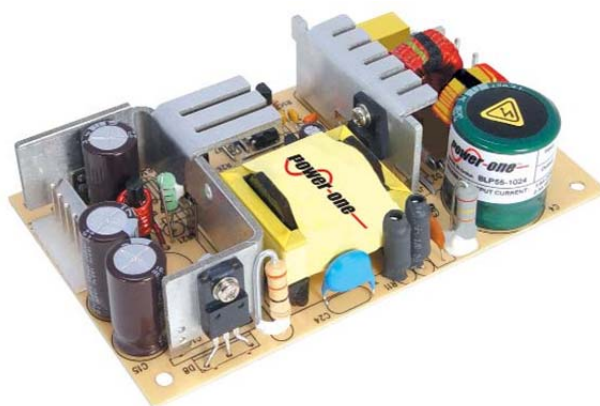


**Figura 18.** PCB ET-MINI DS1307.

Tanto el esquemático como la forma de conectarlo con el Arduino Mega están descritos en el “ANEXO IX: Módulo Real Time Clock”.

### 3.5. Fuente de alimentación

Para alimentar todo el conjunto de placas se ha seleccionado una fuente de alimentación de 40 W de potencia y capaz de generar tres niveles de tensión 5 V (hasta 4 A), 12 V (hasta 2 A) y -12 V (hasta 0.5 A), ver Figura 19. De estos 3 niveles de tensión se han utilizado los 5 V para alimentar las placas de acondicionamiento y los 12 V para alimentar el Arduino Mega.



**Figura 19.** Fuente de alimentación.

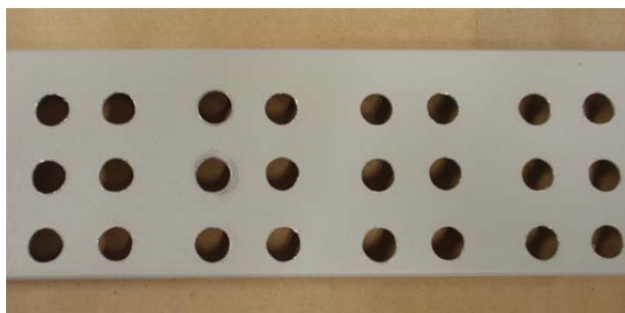
La conexión de la fuente con el resto de placas, a las cuales alimenta, se presenta en el apartado 3.6.

### 3.6. Montaje del Equipo

El montaje de los equipos se llevó a cabo intentando aprovechar al máximo el espacio de la envolvente pero respetando las distancias necesarias para el correcto conexionado entre las distintas placas y estas con los conectores por los que se introducirán las variables eléctricas al equipo. A continuación se detallan los trabajos que se han llevado a cabo a lo largo del montaje de los equipos.

#### 3.6.1. La envolvente y su adecuación

Se eligió una envolvente cuyas dimensiones son 280x305x88 mm; siendo el material del cuerpo acero al fósforo y el material de los paneles frontal y trasero aluminio (al ser un material más blando se facilitan las tareas de taladrado o corte).

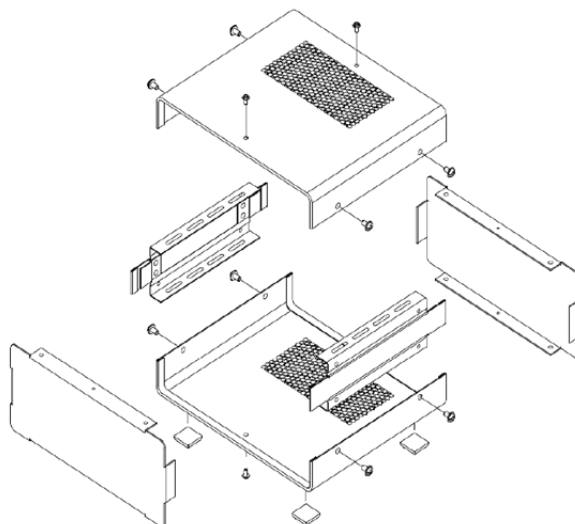


**Figura 20.** Vista panel frontal.



Como se observa en la Figura 20 se realizaron taladros en el panel frontal para poder colocar los conectores de las variables a medir. En el panel trasero hubo que realizar dos aberturas para la alimentación y la salida del cable USB.

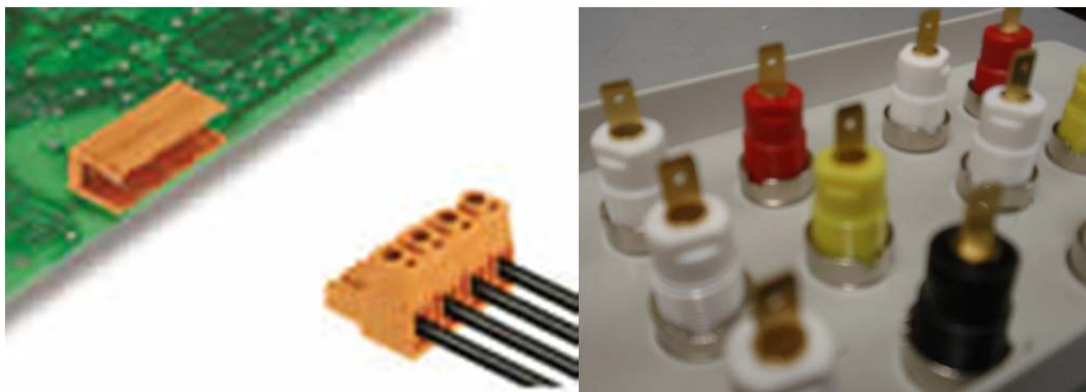
La envolvente cuenta con aberturas laterales en el cuerpo que actúan como ventilación del equipo. El despiece de la misma se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** Despiece envolvente.

### 3.6.2. Conectores

Tanto los conectores que nos permiten introducir las variables a sensar dentro de la envolvente como los que llevan estas mismas señales a las 4 etapas de acondicionamiento tienen que ser capaces de soportar 18 A (máximo corriente alterna) y 750 V (máximo tensión continua). En función a estas limitaciones, los conectores de las placas de acondicionamiento se seleccionaron con una separación de 0,3 pulgadas (Weidmüller SL 7.62/90) que garantizan 18.5 A y 800 V. Se pueden observar en la Figura 22 (izquierda). Los conectores que se seleccionaron para introducir las señales dentro de la envolvente son compatibles con el uso de bananas de seguridad y también cumplen con estos requisitos. Se pueden observar en la Figura 22 (derecha).



**Figura 22.** Tipos de conectores.

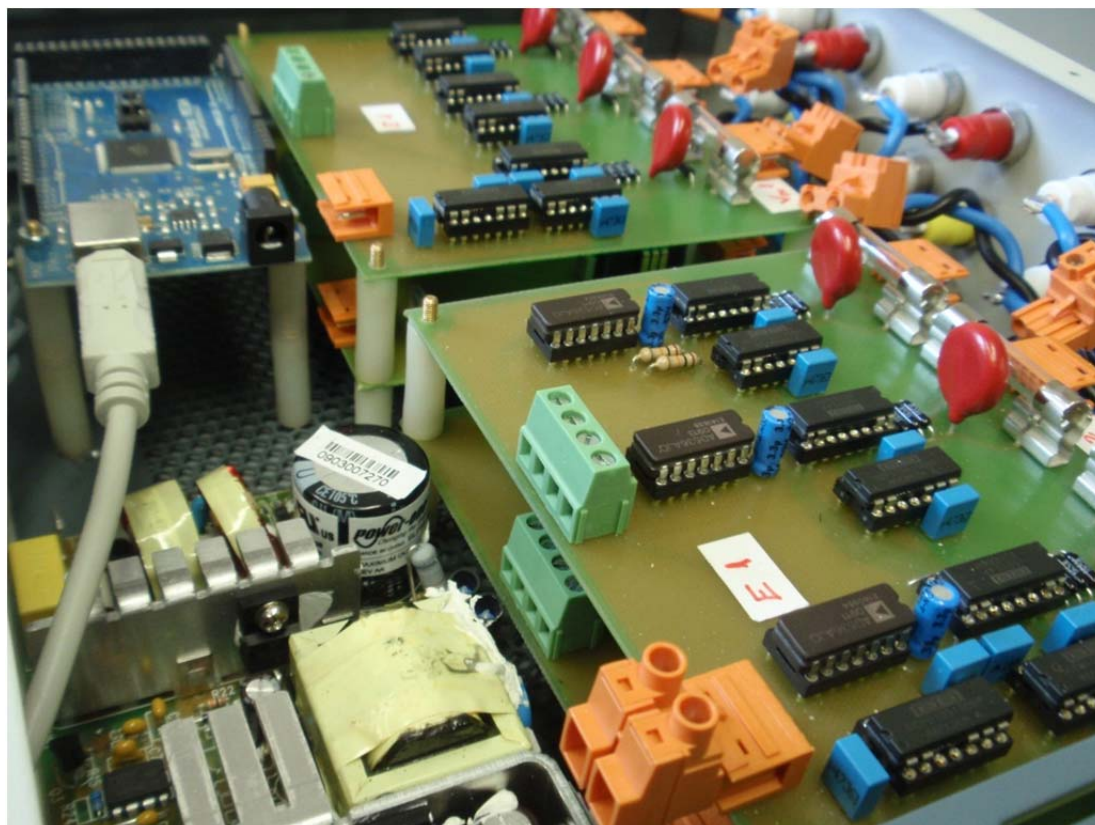
En la Figura 23 se muestran los paneles frontal y trasero después de haber colocado los correspondientes conectores. Se observa también la abertura por la que sale el cable USB. El conector de alimentación cuenta con un fusible y se le soldó un varistor para proteger al equipo contra posibles sobretensiones que pudieran llegar por la alimentación.



**Figura 23.** Vistas de los equipo de medida.

### 3.6.3. Disposición de las placas

Como se ha dicho anteriormente se ha intentado aprovechar al máximo el espacio disponible en la envolvente. Se optó por colocar las placas de corriente debajo de las placas de tensión y el reloj de tiempo real debajo de la placa del microcontrolador, como puede observarse en la Figura 24.



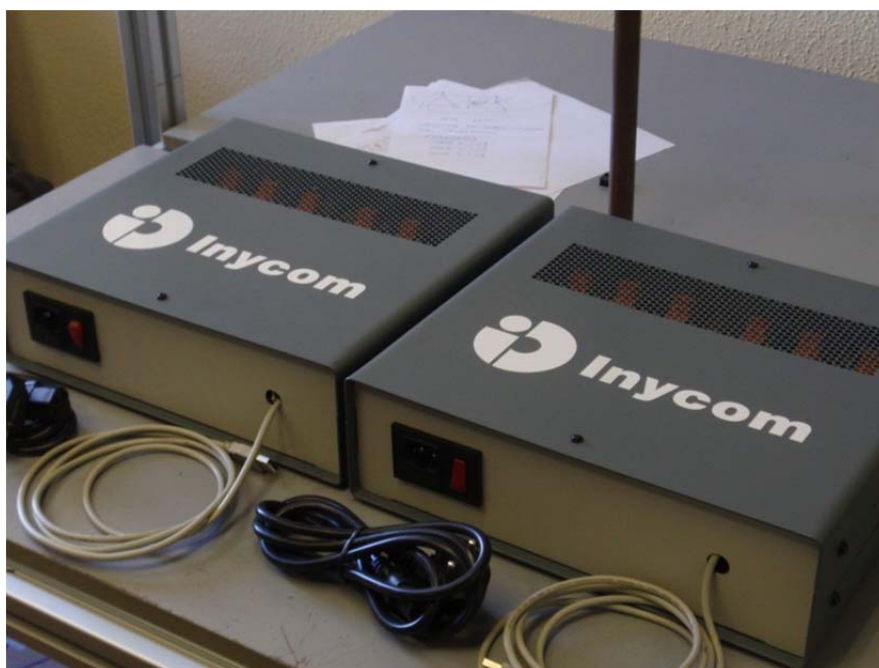
**Figura 24.** Disposición de las placas.

En la Figura 25 se puede observar la distribución de las placas desde arriba así como el cableado entre los conectores que permiten el acceso de las variables a medir al interior de la envolvente y los que conectan con las 4 etapas de adaptación. Se puede observar también el varistor soldado en el conector de alimentación.



**Figura 25.** Vista interior de un equipo de medida.

Una vez se llevaron a cabo todas las conexiones se finalizó con el cierre de la envolvente. En la Figura 26 se muestran los equipos finalizados.



**Figura 26.** Vista exterior de los equipos de medida.

## 4. AJUSTE Y CALIBRACIÓN

### 4.1. Ajuste de las placas de acondicionamiento

El ajuste de las cuatro placas de acondicionamiento necesarias para poder medir los cuatro tipos de variables (tensión y corriente alterna y tensión y corriente continua) se ha realizado por comparación con instrumentos de referencia pertenecientes al Laboratorio de Metrología Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.

La trazabilidad de las medidas se refiere a instrumentos de referencia calibrados periódicamente en laboratorios con acreditación ENAC o equivalente. En cualquier caso, las medidas son trazables a patrones nacionales o internacionales reconocidos. Los datos de dichos instrumentos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Instrumentos de referencia utilizados para el ajuste.

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº DE SERIE	Nº CERTIFICADO
Calibrador	FLUKE	6100A	46439	UKAS 024611
Multímetro	FLUKE	45	5695013	080729.01
Termohigrómetro	FLUKE	5020A	A6A184	ENAC C-4582.0006

Para cada una de las magnitudes se dividió el intervalo en seis puntos. Con el calibrador FLUKE 6100A, conectado a los canales de entrada de cada placa, se generó la magnitud correspondiente mientras se tomaba la lectura del multímetro FLUKE 45, conectado a la salida de cada placa. Las medidas realizadas se presentan en la Tabla 2 y en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Datos del ajuste variables DC

		EQUIPO 1			EQUIPO 2		
	IN	OUT 1 (V)	OUT 2 (V)	OUT 3 (V)	OUT 1 (V)	OUT 2 (V)	OUT 3 (V)
$V_{DC}$	10	0.0863	0.0828	0.0838	0.072	0.0844	0.0847
	150	0.9936	0.9919	0.99	0.9803	0.9922	0.9924
	300	1.967	1.967	1.961	1.954	1.9655	1.966
	450	2.94	2.941	2.935	2.927	2.939	2.94
	600	3.912	3.917	3.909	3.9	3.913	3.914
	675	4.339	4.405	4.397	4.386	4.4	4.401
$I_{DC}$	0.25	2.538	2.5461	2.5371	2.516	2.5218	2.5219
	2	2.6061	2.6166	2.6051	2.5885	2.5939	2.5943
	4	2.6821	2.6951	2.6814	2.6704	2.6762	2.6764
	6	2.7642	2.7849	2.7646	2.7564	2.7629	2.7614
	8	2.8515	2.8709	2.852	2.8416	2.8481	2.8479
	10	2.9364	2.9473	2.9369	2.9284	2.934	2.9329



**Tabla 3.** Datos del ajuste variables AC.

	IN	EQUIPO 1			EQUIPO 2		
		OUT 1 (V)	OUT 2 (V)	OUT 3 (V)	OUT 1 (V)	OUT 2 (V)	OUT 3 (V)
<b>V<sub>AC</sub></b>	10	0.116	0.124	0.118	0.12	0.1285	0.126
	100	0.986	0.9945	0.9966	0.9888	1.0128	1.0108
	200	1.9684	1.984	1.989	1.9754	2.028	2.03
	300	2.949	2.9695	2.9777	2.9585	3.0255	3.036
	400	3.9291	3.95	3.9641	3.9416	4.019	4.037
	500	4.908	4.9341	4.952	4.9242	5.0092	5.0354
<b>I<sub>AC</sub></b>	0.5	0.01128	0.01183	0.01196	0.01968	0.01183	0.01825
	4	0.10117	0.10238	0.10224	0.16687	0.10175	0.16605
	8	0.20033	0.20126	0.20116	0.32999	0.20035	0.33013
	12	0.29873	0.29982	0.29968	0.49227	0.29888	0.49308
	16	0.3958	0.39712	0.39688	0.65468	0.39666	0.65565
	20	0.4932	0.49479	0.49445	0.8175	0.49451	0.81866

Se realizaron medidas en distintos puntos del intervalo para poder obtener una recta por canal de la siguiente forma:

$$Y = a \cdot X + b$$

Las ganancias y los Offset obtenidos se presentan en la Tabla 4 y en la Tabla 5.

**Tabla 4.** Ganancia de cada canal de ambos equipos.

	EQUIPO 1			EQUIPO 2		
	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3
<b>V<sub>DC</sub></b>	155.51	153.86	154.17	154.14	154.09	154.05
<b>I<sub>DC</sub></b>	24.437	24.034	24.328	23.641	23.671	23.695
<b>V<sub>AC</sub></b>	102.16	101.76	101.29	101.88	100.23	99.615
<b>I<sub>AC</sub></b>	40.542	40.474	40.506	24.491	40.485	24.408

**Tabla 5.** Offset de cada canal de ambos equipos.

	EQUIPO 1			EQUIPO 2		
	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3
<b>V<sub>DC</sub></b>	-4.8517	-2.6529	-2.6613	-1.1295	-2.9212	-2.9477
<b>I<sub>DC</sub></b>	-61.664	-60.895	-61.361	-59.188	-59.263	-59.467
<b>V<sub>AC</sub></b>	-1.2856	-1.9839	-1.5027	-1.4733	-2.6354	-1.9400
<b>I<sub>AC</sub></b>	-0.0555	-0.0838	-0.0862	-0.0436	-0.0648	-0.0129

## 4.2. Calibración de los equipos

Una vez ajustados los canales de entrada según lo expuesto en el apartado 4.1, se procedió a calibrar los equipos completos. Para ello se utilizaron instrumentos de referencia pertenecientes al Laboratorio de Metrología Eléctrica de la Universidad de Zaragoza. Los datos de dichos instrumentos se pueden observar en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Instrumentos de referencia utilizados para la calibración.

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº DE SERIE	Nº CERTIFICADO
Calibrador	FLUKE	5500A	6210002	RVA 445546
Calibrador	FLUKE	6100A	46439	UKAS 028934
Termohigrómetro	FLUKE	5020A	A6A184	ENAC C4582.0006

Se han realizado 10 medidas en cada punto de calibración, estas medidas se pueden consultar en el “ANEXO X: Toma de datos de la calibración”.

La incertidumbre típica expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura  $k=2$  que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme a la referencia [6].

Los certificados de calibración se expidieron de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida al laboratorio por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales. Estos certificados se pueden consultar en el “ANEXO XI: Certificados de calibración”.

**Tabla 7.** Resultados de la calibración: Error (%).

	EQUIPO 1			EQUIPO 2		
	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3
$V_{DC}$	1.05%	0.90%	0.51%	0.80%	0.78%	0.69%
$I_{DC}$	4.06%	2.22%	4.52%	6.80%	6.40%	3.04%
$V_{AC}$	1.02%	0.88%	0.59%	0.85%	1.89%	1.56%
$I_{AC}$	7.93%	7.50%	7.61%	4.42%	7.22%	5.02%

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos de la calibración de ambos equipos. En dicha tabla se expresa el error (en %) como el máximo obtenido del sumatorio de la mayor desviación y su incertidumbre expandida para cada uno de los puntos de la calibración. Se ha resaltado en rojo el error mayor para cada una de las variables de los dos equipos.

$$Error (\%) = \frac{Desviación (V) + Incertidumbre Expandida (V)}{Valor del Patrón (V)} \times 100$$

## 5. INSTALACIÓN Y RESULTADOS

El día 12/02/2010 se llevó a cabo la instalación de los dos equipos de medida para registrar la evolución temporal de las variables eléctricas de entrada y salida en los inversores del seguidor solar que la Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del Hidrógeno en Aragón posee en el parque tecnológico Walqa en Huesca (ver Figura 27).



**Figura 27.** Seguidor ADES 7F18M.

### 5.1. Instalación de los equipos

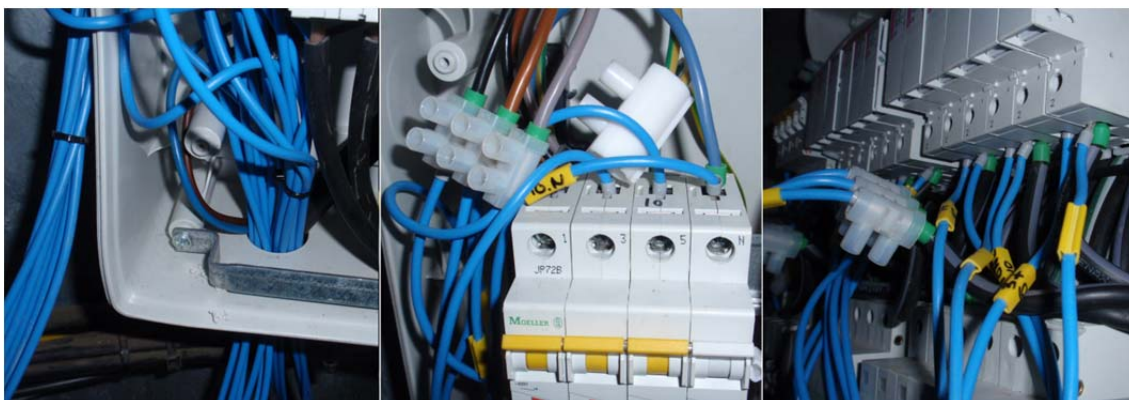
En la Figura 28 (izquierda) se muestra el cuadro de protección que el seguidor solar tiene en su interior, del que se obtienen las magnitudes a registrar. Como se ha mencionado anteriormente el seguidor posee dos inversores, que se encuentran identificados como inversor 9 e inversor 10. En la Figura 28 (derecha) puede observarse la disposición de las conexiones dentro del cuadro de protección para cada uno de los dos inversores. En la parte central del cuadro de protecciones se encuentran las conexiones relativas al inversor 9 y en la parte derecha las del inversor 10.



**Figura 28.** Cuadro de protección.

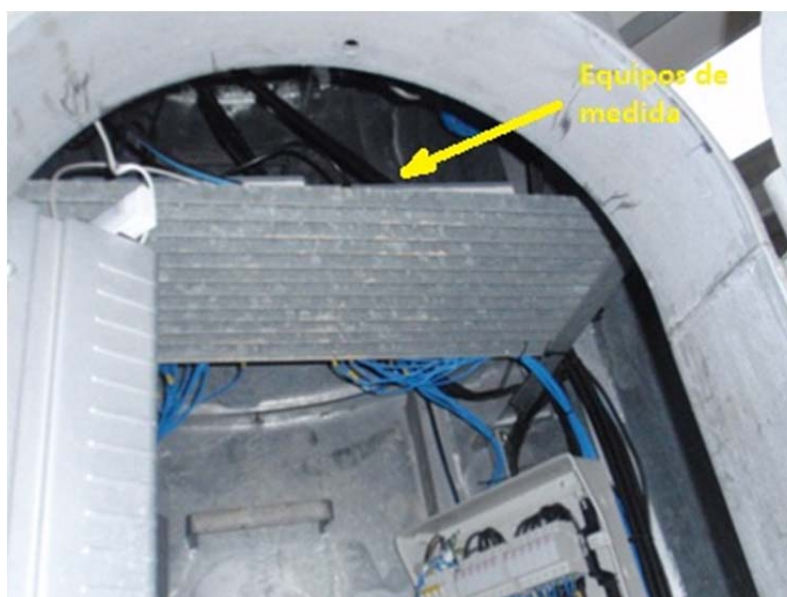
Para cada uno de los inversores se mide la tensión y corriente alterna en el interruptor de alterna del cuadro de protecciones mientras que la medida de tensión y corriente continua se realiza entre los fusibles de protección y los descargadores de cada inversor. El equipo de medida 1 registra los datos del inversor 9 y el equipo de medida 2 se encarga de recoger los datos del inversor 10.

Se embridaron todos los cables salientes del cuadro, al que hubo que hacerle una abertura para poder llevarlos hasta los equipos y a su vez poder cerrar la tapa del cuadro de protección (izquierda). Para las medidas de corriente fue necesario abrir el circuito (centro), mientras que para las medidas en tensión bastó con colocar cables en paralelo (derecha). Todas estas operaciones se pueden observar en la Figura 29.



**Figura 29.** Operaciones en el cuadro de protección.

Los equipos de medida se colocaron encima de una rejilla situada en la parte superior de la torre del seguidor. De esta forma se evitaba que en futuras operaciones de mantenimiento pudiera haber algún percance tanto con los equipos como con los cables que a ellos llegan. Su colocación puede observarse en la Figura 30.



**Figura 30.** Torre del seguidor solar.



En la conexión de los cables provenientes del cuadro de protección con los equipos se utilizaron bananas de seguridad. Se tomó directamente el valor de tensión de los cables de corriente (tanto de alterna como de continua) de esta manera se redujo el número de cables y se introdujeron en las entradas de tensión positiva de los equipos por medio de unos puentes, el resto se trajeron del cuadro de protección como se ha explicado anteriormente. Estas conexiones pueden observarse en la Figura 31.

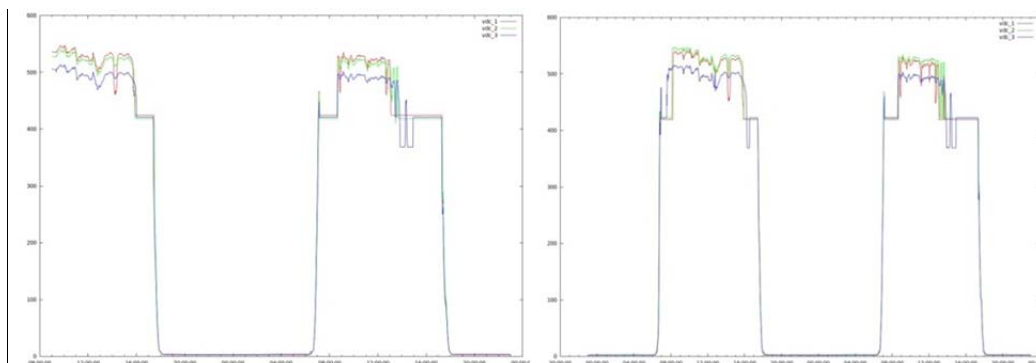


**Figura 31.** Conexiones de medida.

Se disponía de una toma de alterna de 230 V, por lo que la alimentación de los equipos de medida se hizo directamente de dicha toma. En cuanto al cable USB, se dejó accesible para poder hacer las descargas de los datos en una situación de menor riesgo posible para la persona que realice la descarga, sin necesidad de entrar en contacto con el equipo ni acercarse a los cables de medida.

## 5.2. Datos registrados

Tras finalizar la instalación se verificaron tanto las conexiones como las medidas que empezaban a registrar los equipos. Se pudo observar como una de las señales en continua de cada equipo registraba valores inferiores a las otras dos, este hecho es debido a que dos de las seis señales provenientes del seguidor cuentan con un panel menos que las otras cuadro, como se explicó en el apartado 2.1 (ver Figura 32).



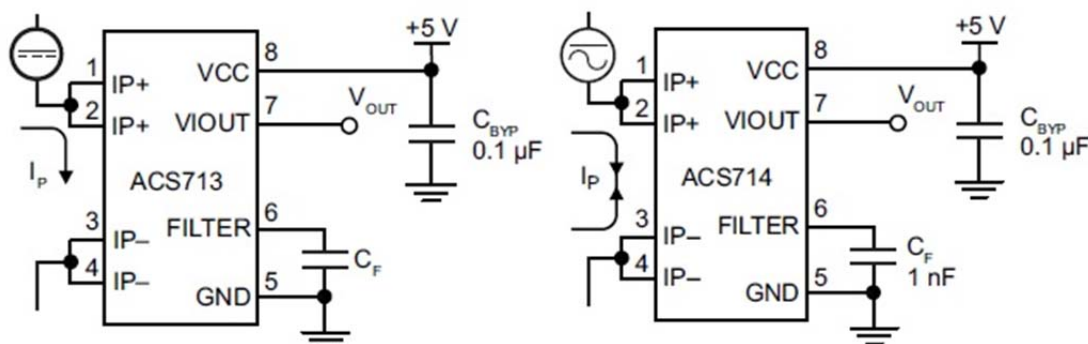
**Figura 32.** Tensión continua, equipo 1 (izquierda) y equipo 2 (derecha).

Se pueden ver imágenes de todas las variables registradas en el “ANEXO XII: imágenes de datos registrados por los equipos”.

## 6. MEJORAS Y DESARROLLOS FUTUROS

Lo expuesto en los apartados anteriores, recoge el trabajo llevado a cabo para la creación y puesta en marcha de los equipos de medida objeto de este proyecto y en el apartado que aquí comienza se ha querido plasmar mejoras en función de los resultados obtenidos.

En primer lugar y observando los resultados obtenidos en la Tabla 7. Se puede concluir que el error en las medidas de corriente es excesivo. Este hecho es debido al bajo aprovechamiento del rango de los conversores analógico digitales por parte del sensor Hall ( $<0.5$  V). Se propone como alternativa la utilización del sensor ACS713 para la medida de corriente continua y el sensor ACS714 para la medida de corriente alterna, ambos son capaces de soportar hasta 20 A, cuentan con un ancho de banda de 80 kHz y una salida de 0 a 5 V.



**Figura 33.** Sensores Hall: ACS713 y ACS714.

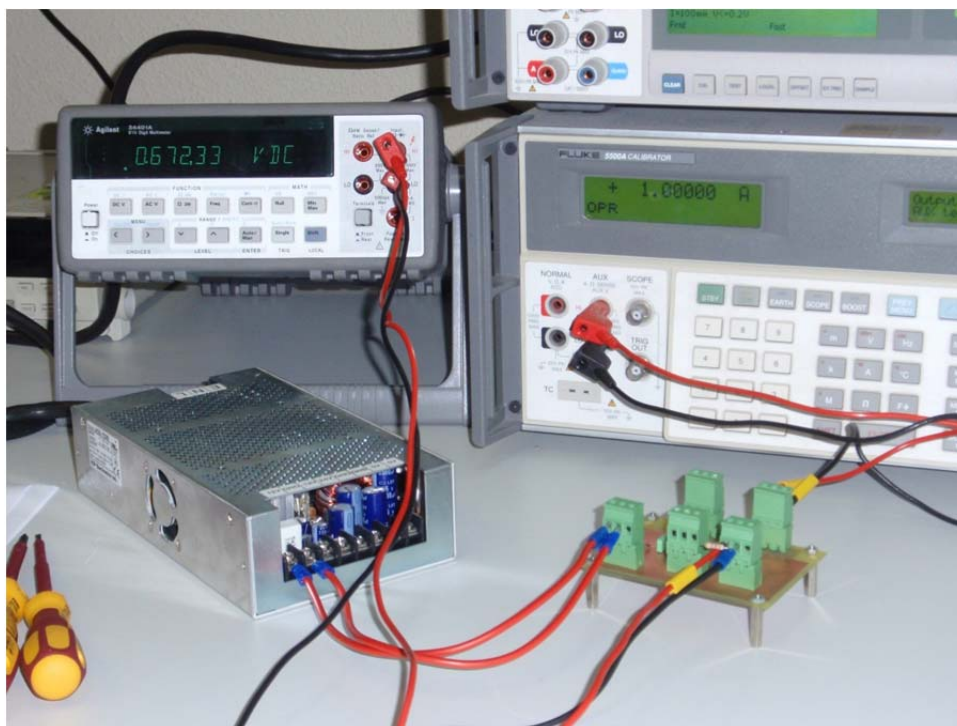
Se ha analizado el funcionamiento de uno de ellos (ACS713). Para ello se ha construido una placa de circuito impreso con dos canales y se han realizado pruebas con equipos del LME, en la Tabla 8 se pueden observar los equipos utilizados para las pruebas de funcionamiento.

**Tabla 8.** Instrumentos de referencia utilizados para las pruebas.

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº DE SERIE	Nº CERTIFICADO
Multímetro digital	AGILENT	34401A	MY41046965	ENAC200804600480
Calibrador	FLUKE	5500A	6210002	RVA 445546
Termohigrómetro	FLUKE	5020A	A6A486	ENAC C-4582.0006

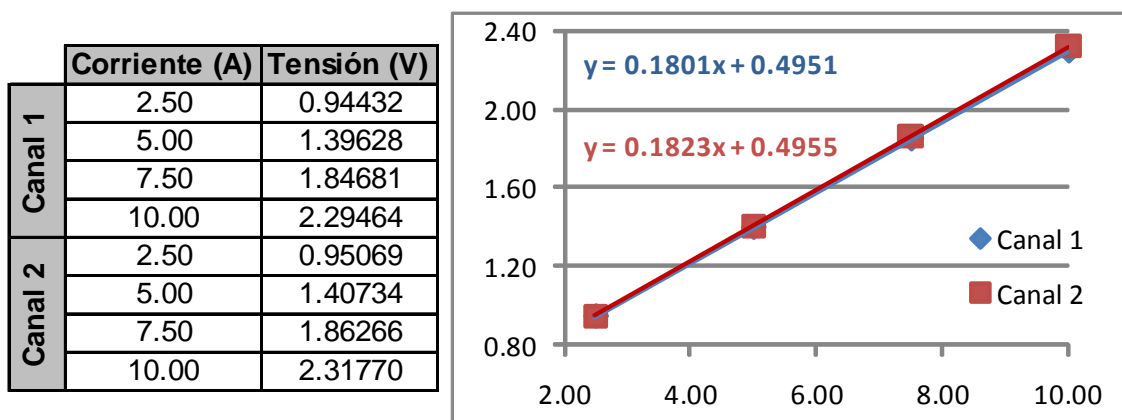
Tanto la placa de circuito impreso como los datos obtenidos en las pruebas de funcionamiento se pueden observar en el “ANEXO XIII: Sensor Hall Alternativo”.

En las pruebas se conectó el generador de intensidad a cada una de las entradas de la placa, las salidas al multímetro y fue alimentada por una fuente externa. El montaje descrito puede observarse en la Figura 34.



**Figura 34.** Montaje para la realización de pruebas.

Se dividió el intervalo en cuatro puntos (2.5, 5, 7.5 y 10 A) y se realizaron 10 mediciones en cada uno de los puntos. Se calculó la media en cada punto y se obtuvo la recta de ajuste de cada uno de los canales, según se puede observar en la Figura 35.



**Figura 35.** Rectas de ajuste de los sensores Hall.

Una vez obtenidas las rectas de ajuste se calculó la desviación para cada una de las mediciones en cada un punto según la ecuación siguiente:

$$\text{Desviación (\%)} = \frac{\text{Valor medido (V)} - \text{Valor ecuación en el punto (V)}}{\text{Valor ecuación en el punto (V)}} \times 100$$

La máxima desviación obtenida como resultado de las mediciones realizadas se puede observar en la Tabla 9

**Tabla 9.** Desviación máxima (%).

	Canal 1	Canal 2
Desv. Max	0.12%	0.07%

Estos resultados se consideran muy satisfactorios dado que se ha obtenido una gran reducción en el error relativo a la medida de corriente.

Otro aspecto mejorable en los equipos de medida desarrollados son las comunicaciones. Existen en el mercado distintos módulos conectables al arduino mega que podrían evitar tener que desplazarse hasta los equipos para llevar a cabo la descarga de datos. Se destacan los siguientes:

- Módulo **Serie 2 XBee Pro XBP24-BZ7SIT-004** de 2,4GHz de alta potencia de salida (ver Figura 36). Cuenta con una alimentación de 3.3V y un consumo máximo de 215mA, una velocidad de transferencia de 250kbps, una potencia de 50mW (+17dBm) y un alcance de 1500 metros (distancia superior a la que separa el seguidor del edificio de la Fundación Hidrogeno Aragón). Funciona con comandos AT o API.



**Figura 36.** Vistas modulo radio-frecuencia.

- Módulo **GSM SM5100B**. Permite enviar mensajes de texto SMS de forma fácil y conectarse mediante GSM/GPRS con funcionalidades de red TCP/IP. Todo lo que se necesita es conectar una tarjeta SIM (pre-pago o de contrato) y una antena GSM. Con este modulo se podrán realizar llamadas telefónicas, enviar SMS o servidor páginas web mediante GPRS (ver Figura 37).



**Figura 37.** Vista módulo GSM.

## 7. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto fin de carrera se ha diseñado un sistema de monitorización capaz de medir las variables eléctricas de una planta solar fotovoltaica. Se ha cumplido el objetivo principal de materializar este diseño en dos equipos de medida de las mismas características.

Dichos equipos cuentan con una unidad de memoria que le permita almacenar los datos registrados y la posibilidad de comunicarse con un ordenador por medio de una conexión USB tanto para poder cambiar parámetros de los equipos como para llevar a cabo la descarga de los datos, cumpliendo de esta manera con todos los requisitos iniciales.

Se instalaron ambos equipos en el interior de un seguidor solar fotovoltaico en el parque tecnológico Walqa en Huesca. Se estudió la instalación y se llevó a cabo la colocación de dichos equipos de la forma menos invasiva posible.

Se realizaron pruebas con los equipos y se analizaron los resultados (ver Tabla 7). Se concluyó que el error en las medidas de corriente era excesivo debido al bajo aprovechamiento del rango de los conversores analógico digitales por parte del sensor Hall ( $<0.5$  V). Se ha propuesto un sensor alternativo, al cual se le han realizado pruebas de funcionamiento, dando unos resultados francamente satisfactorios, dado que se ha obtenido una gran reducción en el error relativo a la medida de corriente.

Otro aspecto en el que se han propuesto mejoras en los equipos de medida desarrollados son las comunicaciones. Existen en el mercado distintos módulos conectables al arduino mega que podrían evitar tener que desplazarse hasta los equipos para llevar a cabo la descarga de datos. Se han propuesto dos (ver apartado 6).

Desde un punto de vista personal considero que este proyecto fin de carrera ha sido enriquecedor para mí, ya que ha aglutinado partes de diseño por ordenador y de programación con otras eminentemente prácticas como son la construcción e instalación de los equipos de medida.

Añadiendo la satisfacción que genera el haber creado algo y ver que funciona.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Aplicaciones de Energías Sustitutivas S.L. (s.f.). [www.adestv.es](http://www.adestv.es/energias-renovables/energia-solar/seguidor-solar). Obtenido de <http://www.adestv.es/energias-renovables/energia-solar/seguidor-solar>
- [2] Ingeteam. (s.f.). [www.ingeteam.com](http://www.ingeteam.com). Obtenido de <http://www.ingeteam.com>
- [3] Barrado Bautista, A., & Lázaro Blanco, A. (2007). Problemas de Electrónica de Potencia. Madrid: Pearson.
- [4] Torres Portero, M., & Torres Portero, M. A. (2004). Diseño e Ingeniería Electrónica Asistida con PROTEL DXP. RA-MA.
- [5] Arduino. (s.f.). [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). Obtenido de <http://www.arduino.cc>
- [6] European co-operation for Accreditation. (1999). EA 4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.